

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 101 18 121.3

**Anmeldetag:** 11. April 2001

**Anmelder/Inhaber:** Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe/DE;  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
Köln/DE.

**Erstanmelder:**  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe/DE

**Bezeichnung:** Mikrowellentechnische Einrichtung zur Eisfreihaltung  
und Enteisung formstabiler Hohlkörper-Strukturen an  
der Oberfläche und Verfahren zum Betreiben der  
Einrichtung

**IPC:** B 64 D, H 05 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 11. April 2002  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag



Ebert

Forschungszentrum  
Karlsruhe GmbH  
ANR 5661498

Karlsruhe, den 9. April 2001  
PLA 0116 Mh/he

Mikrowellentechnische Einrichtung zur Eisfreihaltung und Ent-  
eisung formstabiler Hohlkörper-Strukturen an der Oberfläche  
und Verfahren zum Betreiben der Einrichtung

Forschungszentrum  
Karlsruhe GmbH  
ANR 5661498

Karlsruhe, den 9. April 2001  
PLA 0116 Mh/he

**Patentansprüche:**

1. Mikrowellentechnische Einrichtung zur Eisfreihaltung und Enteisung formstabiler Hohlkörper-Strukturen an der Oberfläche, die meteorologischen Einflüssen der Atmosphäre ausgesetzt sind und im Bereich der von der Atmosphärenluft angeströmten Kanten zumindest abschnittsweise eisfrei gehalten werden und zumindest dort aus Faserverbundwerkstoff aus Kohlefaser, CFK, oder Glasfaser, GFK, oder einem davon oder eine andere Faser mit Additiven bestehen, der an seiner der Atmosphäre ausgesetzten Oberfläche einen metallischen Überzug zur Umgebung hin hat, und jede Struktur mikrowellendicht ist, bestehend unter anderen in diesen Hohlkörper eingebauten Komponenten:  
mindestens einem an eine elektrische Energiequelle angeschlossenen Netzteil,  
mindestens einer über ein Netzteil betriebenen, zur Umgebung hin mikrowellendicht gekapselten Mikrowellenquelle, an je eine Mikrowellenquelle angeschlossenen Hohlleiter, die einen vorgegebenen Bereich der Wand des Hohlkörpers mit der Mikrowelle beaufschlagt und dadurch erwärmt, dadurch gekennzeichnet, dass  
der zur Atmosphäre exponierte, abschnittsweise zu enteisende Bereich einer solchen Kante in vorzugsweise flächengleiche, entlang der Kante aneinandergereihte Oberflächensegmente gegliedert ist, deren von der Kante jeweils zwei weglaufernde Grenzen mit dem Verlauf jeweils einer von der Kante weglaufernden, in der Hohlkörper-Struktur verankerten Rippe und deren beide andern zwei Grenzen mit dem zur Kante parallelen, in der Hohlkörper-Struktur verankerten Holms zusammenfällt,

durch die Oberflächensegmente, Rippen und den Holm im Innern einer solchen Hohlkörper-Struktur entlang der luftangeströmten Kante Kammern bestehen, die jeweils zu ihrer Umgebung hin mikrowellendicht abgeschottet sind und im Innern jeder Kammer an der von darin aus gesehenen Innenseite der Wand des Holms parallel zur Kante die Hohlleiterauskoppelstruktur befestigt ist, die durch die Wand des Holms hindurch an ihre Mikrowellenquelle angeflanscht ist, wobei die Geometrie der Kammern und die Frequenz der Mikrowelle derart ist, dass sich in jeder Kammer bei zugehörig eingeschalteter Mikrowellenquelle ein elektromagnetisches Feld mit Übermodierung zur flächengleichen/gleichmäßigen Erwärmungseintrag in der Wand der Oberflächensegmente aus Faserverbundwerkstoff anregt, im eisfrei zu haltenden Bereich entlang der luftangeströmten Kante und entlang der Grenze des Oberflächensegments bis mindestens zum Holm am Stoß der dortigen Rippe in der Wand der Hohlkörper-Struktur metallische Doppelleitungen aus elektrisch gut leitendem Material verlaufen sind, und zusammen mit der jeweiligen Kühlschlange an den Mikrowellenquellen entlang der jeweiligen Kante zu einem geschlossenen Kühlkreislauf derart zusammen geschlossen sind, dass in den Doppelleitungen entlang der Kante und den Rippen an den Grenzen der Oberflächensegmente eine Gegenströmung besteht und die Kühlschlangen an den Mikrowellenquellen strömungstechnisch zueinander in Reihe liegen.

2. Mikrowellentechnische Enteisungsvorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Auskoppelstrukturen einen runden Querschnitt haben.
3. Mikrowellentechnische Enteisungsvorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Auskoppelstrukturen einen rechteckigen Querschnitt haben, um in der Einbaukam-

mer bei der vielmodigen Anregung auch den Grundmode mit dabei zu haben.

4. Enteisungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 und 3, dadurch gekennzeichnet, dass als Mikrowellenquellen unter Berücksichtigung der Geometrie des zu erwärmenden Bereichs, der Betriebsfrequenz und des Leistungsbedarfs Magnetrons oder Klystrons oder Rückwärtswellen-(Backward-wave)-Oszillatoren (BWO) oder EIO (Extended Interaction Oscillators) oder Gyrotrons oder Klystroden sind.
5. Enteisungsvorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass das die in die Faserstruktur integrierten mit Kühlmittel durchströmbaren Doppelleitungen eines Bereichs zumindest in den Enteisungsbereichen metallische Rohre mit rundem oder polygonalem Querschnitt sind.
6. Enteisungsvorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass ein Kühlmittelkreislauf mindestens die Doppelleitungen und damit verbundenen Mikrowellenquellen eines zu eisfrei zu haltenden und zu enteisenden Bereichs als Bestandteil hat.
7. Enteisungsvorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass in jeden Kühlmittelkreislauf zur Unterstützung der Kühlmittelströmung eine Kühlmittelpumpe eingebaut ist.
8. Verfahren zum Eisfreihalten und Enteisen eines vorgegebenen Oberflächenbereichs an formstabilen Hohlkörper-Strukturen, die meteorologischen Einflüssen der Atmosphäre ausgesetzt sind und im Bereich der von der Atmosphärenluft angeströmten Kanten zumindest abschnittsweise eisfrei gehalten werden und zumindest dort aus Faserverbundwerkstoff bestehen, der an seiner der Atmosphäre ausgesetzten

Oberfläche einen metallischen Überzug zur Umgebung hin hat, und jede Struktur mikrowellendicht ist, die unter anderem in diese Hohlkörper folgende Komponenten eingebaut haben:

mindestens einem an eine elektrische Energiequelle angeschlossenen Netzteil, mindestens einer über ein Netzteil betriebenen Mikrowellenquelle,

an je eine Mikrowellenquelle angeschlossenen Hohlleiter, die einen vorgegebenen Bereich der Wand des Hohlkörpers mit der Mikrowelle beaufschlagt und dadurch erwärmt, wodurch:

der zur Atmosphäre exponierte, abschnittsweise zu enteisende Bereich einer solchen Kante in vorzugsweise flächengleiche, entlang der Kante aneinandergereihte Oberflächensegmente gegliedert ist, deren von der Kante jeweils zwei weglaufende Grenzen mit dem Verlauf jeweils einer von der Kante weglaufenden, in der Hohlkörper-Struktur verankerten Rippe und deren beide andern zwei Grenzen mit dem zur Kante parallelen, in der Hohlkörper-Struktur verankerten Holms zusammenfällt,

durch die Oberflächensegmente, Rippen und den Holm im Innern einer solchen Hohlkörper-Struktur entlang der luftangeströmten Kante Kammern bestehen, die jeweils zu ihrer Umgebung hin mikrowellendicht abgeschottet sind und im Innern jeder Kammer an der von darin aus gesehenen Innenseite der Wand des Holms parallel zur Kante die Hohlleiterauskoppelstruktur befestigt ist, die durch die Wand des Holms hindurch an ihre Mikrowellenquelle angeflanscht ist, wobei die Geometrie der Kammern und die Frequenz der Mikrowelle derart ist, dass sich in jeder Kammer bei zugehörig eingeschalteter Mikrowellenquelle ein elektromagnetisches Feld mit Übermodierung zur flächengleichen/gleichmäßigen Erwärmungseintrag in der Wand der Oberflächensegmente aus Faserverbundwerkstoff anregt,

im eisfrei zu haltenden Bereich entlang der luftangeströmten Kante und entlang der Grenze des Oberflächensegments bis mindestens zum Holm am Stoß der dortigen Rippe in der Wand der Hohlkörper-Struktur metallische Doppelleitungen aus elektrisch gut leitendem Material verlaufen sind, und zusammen mit der jeweiligen Kühlschlange an den Mikrowellenquellen entlang der jeweiligen Kante zu einem geschlossenen Kühlkreislauf derart zusammen geschlossen sind, dass in den Doppelleitungen entlang der Kante und den Rippen an den Grenzen der Oberflächensegmente eine Gegenströmung besteht und

die Kühlschlangen an den Mikrowellenquellen strömungstechnisch zueinander in Reihe liegen,

dadurch gekennzeichnet, dass

bei den Hohlkörper-Strukturen der jeweilige Kühlmittelkreislauf eines Bereichs der flächengleichen Oberflächensegmente entlang einer solchen luftangeströmten Kante zumindest bei Vereisungsgefahr zur Eisfreihaltung der linienförmigen Struktur entlang der Doppelverrohrung ständig aufrecht erhalten wird und

die entlang einer angeströmten Kante der Hohlkörper-Struktur im Hohlkörper zugeordneten und an dem zugehörigen Abschnitt des Holms an diesem montierten Mikrowellenquellen zyklisch derart betrieben werden, dass

innerhalb der Zykluszeit mindestens eine Mikrowelle davon betrieben wird, die übrigen ausgeschaltet bleiben und umgekehrt und zwischen zwei gerade eingeschalteten Mikrowellenquellen mindestens eine ausgeschaltete liegt,

jede Mikrowellenquelle während ihrer Einschaltzeit puls-breitengeregelt oder im Dauerstrich betrieben werden kann, womit der Wärmeeintrag in das zugehörige Oberflächensegment dosierbar ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die in jeden Kühlmittelkreislauf eingebaute Kühlmittelpumpe zur Eisfreihaltung und Enteisung die über den Temperaturgradienten getriebene Kühlmittelströmung zumindest zum Anschieben derselben aktiv betrieben wird.



**Beschreibung:**

Die Erfindung betrifft eine mikrowellentechnische Einrichtung zur Eisfreihaltung und Enteisung formstabiler Hohlkörper-Strukturen an der Oberfläche, die meteorologischen Einflüssen ausgesetzt sind und im Oberflächenbereich der von der Atmosphärenluft angeströmten Kanten zumindest abschnittsweise eisfrei gehalten werden.

Der Ansatz von Eis an solchen Strukturen beeinträchtigt die vorgesehene Umströmung der Luft und die Art der Strömung empfindlich, was insbesondere in der Luftfahrt zu aerodynamisch problematischen Situationen und sogar aerodynamisch unkontrollierbarem Verhalten führen kann.

Die Anstrengungen, die vereisungsgefährdete Bereiche an exponierten Strukturen eisfrei zu halten, sind vielfältig und reichen vom Besprühen oder Bespülen solcher Flächen mit einer die Eisbildung hemmenden Flüssigkeit, über das Anströmen der Innenflächen dieser Strukturen mit Warmluft bis zum ohmschen Beheizen solcher Bereiche über in die Wand eingelegte Metallnetze.

Die Forderung ist: Bedingungen zur Eisbildung müssen neutralisiert werden. Das gelingt beim Enteisen mittels Flüssigkeit nur vorübergehend, insbesondere beim Verwenden von Enteisungsflüssigkeit. Der anhaftende Film reißt schon bei starker Umströmung ab. Regen etwa spült ein solches Mittel je nach Stärke früher oder später schon ab.

Im Leichtkörperbau setzt sich mehr und mehr der Aufbau von Hohlkörper- oder Schalenstrukturen aus Prepreg, CFK- und GFK-Kompositteile allgemein: Faserverbundwerkstoffe mit für den Verwendungszweck Eigenschaft-verbessernden Additiven durch. Allerdings besitzen solche Verbundwerkstoffe, wenn auch sehr

formstabil/-steif und damit mit hoher mechanischer Festigkeit/ und Zähigkeit versehen, bei einer im Vergleich zu Metall sehr schlechten, anisotropen thermischen Leitfähigkeit mit der Gefahr der Bildung von Wärmestaus und Überhitzung und damit der Gefahr der lokalen Delamination beim Anblasen mit heißer Luft, bzw. die Flugsicherheit betreffende starke Beschränkung der Möglichkeit, ausreichende Flächenleistungsdichten an der strömungszugewandten, potentiell eisbehafteten Fläche einbringen zu können.

In der DE 100 16 261 wird ein Kompaktes mikrowellentechnisches System zum Enteisen und/oder Vorbeugen einer Vereisung der äußeren Oberfläche von meteorologischen Einflüssen ausgesetzten Hohlraum- oder Schalenstrukturen beschrieben. Die Hohlraum-/Schalenstrukturen bestehen aus mit thermoplastischen oder duroplastischen Kunststoffsystemen ausgehärteten Verbundwerkstoffen mit dielektrischen Eigenschaften. Das System hat mindestens eine Mikrowellenquelle, die in ihrer Leistung steuerbar, gepulst oder kontinuierlich betrieben, über ein angeflanshtes Hohlleiter- und Auskoppelsystem im Frequenzbereich von 900 MHz bis 20 GHz vorgegeben monochromatisch abstrahlt. Zumindest die vereisungsgefährdete Front der jeweiligen Struktur hat einen laminierten Aufbau, der aus einem Formkörper als Trägerstruktur aus dielektrischem Verbundmaterial einer der Beanspruchung angepassten Schub-, Druck und Biegefestigkeit besteht. Die Struktur ist äußerlich mit einer metallischen Haut als Blitzschutz überzogen ist. In Verbindung mit anderen anstoßenden oder unmittelbar angrenzenden Baustrukturen mit metallischer Oberfläche ist sie elektrisch leitend verbunden ist, so dass darüber hinaus ein metallisch umschlossener Hohlraum besteht.

Im Hohlraum oder in Kammern eines jeden solchen Formkörpers ist mindestens ein für sich alleine betriebenes Mikrowellensystem eingebaut, das aus einer Mikrowellenquelle mit Netz-

und Auskoppereinrichtung aus Hohlleiter und Auskoppelstruktur besteht. Die Auskoppelstruktur ist im Innern des Formkörpers entlang zur äußeren Anströmfront derart aufgestellt, dass die ausgekoppelte Mikrowelle innen entlang dieser mit einer Wellenfront oder nahezu mit einer Wellenfront auf die freie innere Oberfläche des Verbundmaterials auftrifft. Sie penetriert dasselbe und erwärmt den dortigen Frontbereich des Verbundmaterialvolumens durch die Mikrowelleneinwirkung über Volumenheizung. Die Erwärmung erfolgt derart, daß das Verbundmaterial einerseits unter der Einwirkung der Mikrowelle an jeder Stelle weit unterhalb der Delaminationstemperatur von etwa 130°C des Verbundmaterials bleibt und andererseits an der Schnittfläche Formkörper/Metallhaut eine vorgegebene Flächenleistungsdichte bis über 60 kW/m<sup>2</sup> bei anhaftendem Klareis gefahrlos bestehen kann. Die Metallhaut wird dadurch auf einer vorgebbaren, den meteorologischen Anforderungen entsprechenden Temperatur vom Eisschmelzpunkt 0°C bis +70°C und Abtaugeschwindigkeit gehalten, bei der es auf der luftangeströmten Front bei eingeschaltetem Mikrowellensystem mit Sicherheit zu keiner Eisbildung kommt oder angesetztes Eis an der Anströmfront an der Berührfläche mit Einschalten des Mikrowellensystem an-/abgetaut.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine baulich einfache, kompakte, dezentrale Enteisierungseinrichtung für Hohl- oder Schalenkörperstrukturen, die einer atmosphärischen Luftanströmung ausgesetzt sind, bereitzustellen.

Die Aufgabe wird durch mikrowellentechnische Enteisierungseinrichtung gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und seinen kennzeichnenden Merkmalen und einem Verfahren zum Betreiben der Einrichtung gemäß Anspruch 7 gelöst.

Der an der Atmosphäre exponierte Bereich der Hohlkörper-Struktur ist abschnittsweise oder teilweise entlang einer von der

Luftströmung angeströmten Kante zu enteisen bzw. eisfrei zu halten. Dieser eisfrei zu haltende oder zu enteisende Bereich ist entlang der Kante in aneinandergereihte Oberflächensegmente gegliedert. Jedes dieser Segmente hat zwei von der Kante weglaufernde Grenzen, die jeweils mit der Stoßlinie an der Hohlkörper-Wand einer im Hohlkörper dort verankerten Rippe zusammenfällt. Die Grenzlinie des jeweiligen Oberflächensegments schließt sich vollends entlang zweier Linien, die mit den beiden Stoßlinien auf der Hohlkörper-Wand eines in der Hohlkörper-Struktur verankerten Holms zusammenfällt.

Durch die Oberflächensegmente, Rippen und den Holm im Innern einer solchen Hohlkörper-Struktur entlang der luftangeströmten Kante bestehen so Kammern, die jeweils zu ihrer Umgebung hin mikrowellendicht abgeschottet sind, weil sie auf ihrer zur Atmosphäre exponierten Wand eine metallische Haut oder ein mikrowellendichtes Metallnetz haben und die übrigen Wände, die beiden Rippenabschnitte und der zugehörige Holmabschnitt, genauso einen Überzug haben oder aus Hohlraum-Struktur-ggeeignetem Metall, wie Edelstahl oder Hartaluminium, sind. Im Innern jeder Kammer ist an der von darin aus gesehenen Innenseite der Holmwand parallel zur Kante die Hohlleiter-Auskoppelstruktur befestigt. Sie ist durch die Wand des Holms hindurch an ihre zugeordneten Mikrowellenquelle angeflanscht. Die Geometrie der Kammern und die Frequenz der Mikrowelle, je nach dem zwischen 900 MHz und 25 GHz, ist derart, dass in jeder Kammer bei zugehörig eingeschalteter Mikrowellenquelle ein elektromagnetisches Feld mit Übermodierung, also dem Auftreten vieler möglicher Moden, angeregt wird. Damit dringt die Mikrowelle entsprechend der Übermodierung mit gleicher oder mit nahezu gleicher Leistungsflächendichte in die Wand aus Faserverbundwerkstoff, CFK oder GFK, des Oberflächensegments ein und erwärmt diese entsprechend der elektrischen Eigenschaften, also der elektrischen Leitfähigkeit. Durch die das jeweilige Oberflächensegment außen abschirmende Metallhaut kann die Mikrowelle

nicht ins Freie treten. Die gesamte Kammer ist ja nach außen hin mikrowellendicht.

Im eisfrei zu haltenden Bereich entlang der luftangeströmten Kante und entlang der davon auf der äußeren Hohlkörper-Oberfläche abgehenden Grenze des Oberflächensegments bis mindestens zum Holm sind in der Wand der Hohlkörper-Struktur metallische Doppelleitungen aus elektrisch gut leitendem Material eingelassen. Diese Liniendoppelleitungen sind über Schläuche vollends mit den Mikrowellenquellen bzw. mit deren jeweiligem Kühlkanal so zu einem Kühlmittelkreislauf geschlossen, dass in den Doppelleitungen stets eine Gegenströmung besteht und die Mikrowellenquellen hintereinander durchströmt werden. Damit besteht bei stationärem Betrieb der Mikrowellenquellen bei entsprechender Auslegung entlang der Doppelleitungen eine gleiche Temperatur, die alleine von der Abwärme der Mikrowellen herrührt. Jeder Kühlmittelkreislauf kann zur Sicherheit noch an eine weitere Wärmequelle angeschlossen werden, das wäre aber eine übliche Maßnahme, die ergriffen werden würde, falls Redundanz für ein solches System eingerichtet werden müßte.

Bestandteil der Erfindung ist weiter das Verfahren eine mikrowellentechnische Enteisungseinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6 zu betreiben. Ein Vorgang ist das kontinuierliche Eisfreihalten der linienförmigen Struktur in dem Bereich auf der nach außen gerichteten, exponierten Oberfläche der Hohlraum-Struktur durch die in der Wand verlegten Doppelleitungen. Durch den bewussten Aufbau des Kühlmittelkreislaufs in einem solchen Bereich erhält man im Doppelleitungsbereich Gegenströmung, d.h. die Strömung in beiden Leitungen ist dort entgegengesetzt, und eine strömungstechnische Hintereinanderschaltung der Wärmequellen, der Mikrowellenquellen aus dem Bereich durch die Kühlmittel gepumpt wird.

Die Mikrowellenquellen eines Bereichs werden zyklisch betrieben. D.h. mindestens eine Mikrowelle ist für eine einstellbare Zeit eingeschaltet, die übrigen dann nicht und umgekehrt. Dabei ist zwischen zwei eingeschalteten Mikrowellenquellen immer eine ausgeschaltete. Entsprechend der Anzahl Mikrowellenquellen ergibt sich wegen der notwendigen Ein- und Auszeit jeder Mikrowellenquelle die Zykluszeit.

Diese einzelne Zykluszeit eines Bereichs kann mit der von anderen Bereichen zu einer übergeordneten Zykluszeit verkoppelt werden, indem die einzelnen Zykluszeiten addiert werden, das wäre ein zeitlich sequentieller Betrieb, oder indem die Bereiche unabhängig voneinander betrieben werden, das wäre zeitlich eine Art simultaner Betrieb. Schließlich ist auch ein gruppenweiser simultaner Betrieb einrichtbar. Das aber ist eine Steuerangelegenheit und orientiert sich am Wärmebedarf .

Während einer einzelnen Zykluszeit ist also immer mindestens eine Mikrowellenquelle aus einem solchen Bereich eingeschaltet und erzeugt Abwärme für die Linienenerwärmung. Die nahe Umgebung der Doppelleitungen ist während einer Zykluszeit ständig über den in Grenzen variierbaren Wirkungsgrad der Mikrowellenquellen einstellbar warm, und aufgrund der Dimension der mikrowellentechnischen Enteisungseinrichtung so warm, dass die Linienstruktur eisfrei bleibt und eine eventuell vorhandene Eisschicht auf einem Oberflächensegment aus diesem Bereich der Hohlkörper-Struktur während der zugehörigen eingeschalteten Mikrowellenquelle in ihrer Grenzschicht zum Hohlkörper ange-taut und bei einem hinreichend starken Luftstrom schon frühzeitig von der Oberfläche abgerissen oder eben weiter aufgetaut wird. Die Zwischenlinienbereiche können also durchaus kurzzeitig Eis ansetzen. Daher sind die stets eisfreien Linienbereiche eines solchen Bereichs auch derart dimensioniert, dass die Flächen dazwischen immer notwendig schnell und sicher mittels Mikrowelle eisfrei gemacht werden können.

Während der Zykluszeit für einen Bereich können die Mikrowellenquellen während ihrer jeweiligen Einschaltzeit im Dauerstrich oder bei geringerem Wärmebedarf entsprechend pulsbreitengeregt betrieben werden. Damit ist auf technisch einfache und aus anderen technischen Bereichen bekannte Weise stets ein dem Wärmebedarf angemessener Betrieb einstellbar, der mit Hilfe von Temperatur- und Vereisungssensoren und Datenverarbeitungseinrichtungen geregelt/adaptiv ablaufen kann.

In den Unteransprüchen sind spezifische und weitere nützliche Merkmale beschrieben.

Die hohlleiterartige Auskoppelstruktur über die Länge der Kammer hat runden Querschnitt (Anspruch 2). In Anspruch 3 ist der rechteckige Querschnitt derselben beschrieben, mit dem die Übermodiertheit, d.h. das Auftreten vieler möglicher Moden, beginnen mit dem Grundmode in der Kammer angeregt wird.

Als Mikrowellenquellen kommen die in Anspruch 4 aufgeführten Quellen, wie das Magnetron, das Klystron, der Rückwärtswellen-Oszillator (BWO), oder der Verlängerte-Wechselwirkungs-Oszillator, vom Englischen Extended Interaction Oscillator, EIO, sogar auch das Gyrotron und schließlich noch Klystroden, in Frage. Die Auswahl daraus bestimmen die technischen Anforderungen und der Preis, den eine solche Enteisungseinrichtung annehmen darf. Häufig ist auch das Gewicht der Mikrowellenquelle ein nicht zu übersehender Faktor.

An dieser Stelle wird auf eine in der Mikrowellentechnik gängige Schutzeinrichtung hingewiesen, der Zirkulator. Mit ihm zwischen der Quellenauskopplung und der Auskopplung ins Freie oder in einen Resonator werden rücklaufende Wellen in die Quelle unterdrückt und damit eine Zerstörung derselben vermieden. Dieser Aufwand ist insbesondere bei nicht gut abgestimmten Einrichtungen nötig und bedeutet einen zusätzlichen tech-

nischen und monetären Aufwand, eventuell auch noch ein Gewichtsproblem. Diese bekannte Maßnahme wird hier im Schutzzumfang nicht erwähnt, da die erfindungsgemäße Einrichtung wohl abgestimmt, nämlich impedanzangepasst, aufgebaut sein soll und damit eine solche mikrowellentechnische Schutzkomponente als Geld- und Gewichtsfaktor entfallen kann. Sie dennoch in den Aufbau mit einzubeziehen, ist allerdings kein technischer Aufwand.

Um die Wärme entlang der Doppelleitungen widerstandsarm in die Wand der Hohlkörper-Struktur einbringen zu können, sind die Rohrleitungen aus einem die Wärme gut leitenden Material wie Kupfer oder Messing oder noch Edelstahl. Der Querschnitt dieser Leitungen kann rund oder polygonal sein (Anspruch 5). Die Auswahl wird sich am Einbau und der Herstellung der Hohlkörperstruktur orientieren. Ein technisch naheliegender Querschnitt ist der runde, aber auch ein polygonaler, wie der dreieckige, viereckige oder sechseckige, ist üblich.

Die Auslegung der mikrowellentechnischen Einrichtung geht einerseits dahin, dass für ein rasches flächiges Antauen einer Eisschicht genügend Mikrowellenleistung zu Verfügung steht. Damit werden aber auch Mikrowellenquellen eingesetzt, die diese Forderung erfüllen können. Bei einem Wirkungsgrad zwischen 0,4 und 0,8 im besten Fall produziert die Quelle auf jeden Falle Wärme, die hier von dem in der Kühlschlange der Quelle vorbeiströmenden Kühlmittel aufgenommen und zu dem linienförmigen Nutzort transportiert wird. Ein Kühlmittelkreislauf besteht also mindestens aus den Doppelleitungen und damit verbundenen Mikrowellenquellen eines eisfrei zu haltenden und zu enteisenden Bereichs (Anspruch 6).

Die Abwärme der Mikrowellenquellen wird gezielt genutzt und nicht ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Falls der Kühlmittelkreislauf nicht alleine durch den Temperaturgradienten im



Kreislauf in Bewegung kommt, ist zumindest für den Start eine aktiv betriebene Kühlmittelpumpe im Kreislauf eingebaut (Anspruch 7). Ist er in Gang gekommen und hinreichend stark, kann die Pumpe weiter passiv mit laufen.

Bei Redundanzforderungen ist der Kühlmittelkreislauf mit den in Reihe zueinander geschalteten Wärme-/Mikrowellen-Quellen an eine andere Wärmequelle über Ventile angeschlossen. Das aber ist eine Maßnahme, die technisch bekannt ist und bei Bedarf ergriffen wird.

Die Mikrowellenleistung tritt dämpfungsarm an der Auskoppel-einrichtung aus und erwärmt die zur Atmosphäre exponierte Schalenstruktur, die als dissipativer Resonator sehr niedriger Güte wirkt, abschnittsweise flächig gleichmäßig mit einem vorgegebenen zeitlichen Zyklus und kontinuierlich entlang einem vorgegeben Linienbereich mit der Abwärme der im Bereich eingesetzten Mikrowellenquellen. Die mikrowellentechnische Enteisungseinrichtung ist einfach vor Ort in solche Hohlkörper-Strukturen einzubauen, so dass der mikrowellentechnische Bauaufwand auf die Mikrowellenquelle, die Auskoppelstruktur und allenfalls ein kurzes Verbindungsstück von der Quelle bis zur Auskoppelstruktur beschränkt bleibt. Das Netzteil für Gruppen von Mikrowellenquellen, die Gruppen sind für jeweils einen eisfrei zu halten und zu enteisenden Bereich, sitzt zentral. Von ihm gehen nur noch Hochspannungsversorgungsleitungen zu den Mikrowellenquellen.

Ebenso hat ein Kühlmittelkreislauf mindestens eine Gruppe strömungstechnisch hintereinandergeschalteter Mikrowellenquellen besser deren jeweilige Kühlschlange als Wärmequellen. Bei mehreren Gruppen wird sicher der Kühlkreislauf von einer zentral sitzenden Pumpe mit getrieben.

Solche Hohlkörper-Strukturen können eisfrei zu haltenden Einrichtungen/Aufbauten eines Schiffes oder eines Zuges oder eines Straßenverkehrsmittel oder die Rotorblätter einer Windkraftanlage oder sonstige, mit allen meteorologischen Bedingungen fertig zu werdende Strukturen sein.

Die mikrowellentechnische Enteisungseinrichtung ist in vielen technischen Geräten, die in irgend einer Weise der Atmosphäre ausgesetzt sind, einsetzbar. Neben dem Einsatz zu Lande und auf dem Wasser ist seine Bedeutung in der Luftfahrt für die Flugsicherheit hervorzuheben.

Am Beispiel des Einbaus der mikrowellentechnischen Einrichtung in die Hohlkörper-Struktur des Höhen- und Seitenleitwerks eines Flugzeugs wird das im folgenden anhand der Zeichnung mit den Figuren 1 bis 4 näher erläutert.

Es zeigt:

Figur 1 das Höhen- und Seitenleitwerk in der Perspektive mit angedeutetem Einbau der mikrowellentechnischen Einrichtung im Höhenleitwerk,

Figur 2 das Höhenleitwerk mit der eingebauten mikrowellentechnischen Einrichtung,

Figur 3 die eisfrei zu haltenden Bereichen am Höhen und Seitenleitwerk,

Figur 4 die strömungstechnische Verschaltung.

Als Mikrowellenquellen kommen Quellen mit genügender Mikrowellenleistung in Frage, die über die Auskoppelstruktur in der Kammer ein derart viel- oder übermodiges elektromagnetisches Feld anregen können, dass durch die in die Wand des Oberflächensegments eindringende elektromagnetische Welle eine qualitativ derart flächengleiche/-homogene Erwärmung erfolgt, die bei allen zu erwartenden Wetterbedingungen und Temperaturen die Grenzschicht zwischen den Oberflächensegmenten und der

Eisschicht taut. Aus diesen Vorgaben, der elektrischen Eigenschaft - Leitwert - der Hohlkörper-Wand und der notwendigen Vielmöglichkeit in der jeweiligen Kammer wird die abzugebende Mikrowellenleistung bestimmt und die Quelle daraufhin ausgesucht. Da hier eine reichliche Auswahl getroffen werden kann, sei an dieser Stelle der Frequenzbereich von etwa 900 MHz bis etwa 25 GHz angeführt, in dem die ausgewählte Quelle arbeiten muß. An Hand des Wirkungsgrades solcher Quellen, der üblicherweise je nach dem zwischen 0,35 und 0,8 liegt, liegt dann auch die verfügbare Abwärme pro Mikrowellenquelle fest. Die Wand des Höhen- und Seitenleitwerks ist zumindest in den zu enteisenden Bereichen aus einem Faserverbundstoff. In der Luftfahrttechnik werden Kohlefaserverbundwerkstoffe, CFK, dazu verwendet. Diese haben eine gewisse elektrische Leitfähigkeit, dementsprechend koppelt die eindringende Mikrowelle an. Bei andern Faserverbundwerkstoffen kann dies nötigenfalls durch entsprechende Additivbeigabe bei der Halbzeugherstellung eingestellt werden.

Gerade in der Luftfahrttechnik gibt es kräftige Temperaturgradienten zwischen der angeströmten Oberfläche und Gerät im Innern der Hohlkörper-Strukturen. Die Kühleinrichtung der Wärmequelle wirkt ähnlich wie die Einrichtung zur Warmwassererzeugung in einer Kaffeemaschine: das kalte flüssige Medium wird erwärmt und nach vorwärts getrieben. Ist die Erwärmung hinreichend leistungskräftig, dann kommt bei nicht zu hoher Reibung ein naturgetriebener Kreislauf zustande.

Figur 1 zeigt das Höhenleitwerk und die Kreuzung mit dem Seitenleitwerk. Höhenleitwerk ist die Struktur der mikrowellentechnischen Einrichtung angedeutet, nicht aber im Seitenleitwerk, obwohl, dort auch vorgesehen, wie später aus Figur 3 hervorgeht. Es sind hier also die zwei Bereiche am Höhenleitwerk, die bezüglich des Seitenleitwerks spiegelbildlich zueinander angeordnet sind, hervorgehoben. Jeder Bereich ist in

vier Oberflächenbereiche unterteilt. Das deuten die vier aneinander gereihten rohrförmigen Auskoppelstrukturen an, die an ihrem Anfang vom Seitenleitwerk aus gesehen jeweils die zugeordnete Mikrowellenquelle angeflanscht haben. Die eingesetzte Mikrowellenquelle ist hier beispielweise, wie zu Figur 3 beschrieben wird, ein Magnetron, dessen abgegebene Mikrowellenleistung von dem Wärmebedarf, besser der Wärmebedarfsleistung der Wand des zugeordneten Oberflächensegments zur ausreichend raschen Erwärmung der dortigen Metallhaut benötigt wird. Die Abwärme des Magnetrons ermittelt sich aus seinem Wirkungsgrad, der je nach dem zwischen etwa 0,4 und 0,8 liegt. Das die Mikrowellen/Magnetrons versorgende Netzteil ist dementsprechend mindestens für den leistungsstärksten Zyklus dimensioniert.

Figur 2 zeigt die Situation an einer Flügelhälfte des Höhenleitwerks deutlicher. Das Seitenleitwerk ist nicht mehr angedeutet, es ist entfernt und zeigt zwischen den beiden Flügeln das Netzteil für die Versorgung der beiden Bereiche im Höhenleitwerk und des hier nicht angedeuteten Bereiches im Seitenleitwerk (siehe Figur 3). Vier hohleiterförmige Auskoppelleinrichtungen sind, hintereinander entlang der Anströmkante des Flügels, in vorgegebenem Abstand zu dieser und der dortigen Flügelwand an dem dort verlaufenden Holm angebaut. Die dicken Doppellinien deuten den Verlauf der Doppelleitungen in der Flügelwand an und zeigen gleichzeitig mit ihren beidseitigen Abzweigungen von der Anströmkante nach hinten die flächengleichen Oberflächensegmente des zu enteisenden Bereichs an. Die Umgebung entlang der Linien ist derartig durch den Kühlkreislauf erwärmt, dass sie ständig eisfrei ist. Wie die Doppelleitungsabzweige von der Anströmkante weg, so verlaufen auch die Rippen im Flügel nach hinten und bilden zusammen mit der Holmteilwand und der Flügelsegmentwand die jeweilige Kammer mit ihrer Auskoppelleinrichtung. An der Stoßlinie des Holms mit der Flügeloberfläche tauchen die fünf Doppelleitungen beidseitig ins Flügelinnere ein und koppeln über Schläuche an der Kühl-

schnecke der jeweiligen Mikrowellenquelle, und zwar so, dass die Wärmequellen im Kühlkreislauf hintereinander liegen und die Kühlmittelströmung in den Doppelleitungszweigen und entlang der Anströmkante entgegengesetzt sind. Ein Leitungsprinzip ist in Figur 4 deutlich dargestellt.

In Figur 3 ist die Situation dreier eisfreier Linienbereiche und der zugehörigen, eisfrei zu machenden, flächengleichen Oberflächensegmente am Höhen- und Seitenleitwerk schematisch dargestellt. Die Situation ist in die Ebene geklappt. Die beiden Höhenleitwerksbereiche liegen spiegelbildlich zueinander und sind jeweils, im Gegensatz zu Figuren 1 und 2, in nur drei flächengleiche Oberflächensegmente 1, 2 und 3 durch die abgehenden Doppelleitungszweige aufgeteilt. Das senkrecht darunter liegende einfache Oberflächensegment 4 ist das des Seitenleitwerks.

Die jeweils begrenzenden beiden dünnen Linien der Bereiche deutet die Spur des zum Bereich gehörenden Holms an. Die dick ausgezogenen Linien zeigen die Unterteilung und deuten damit die Verlegung der Rohre des jeweiligen Kühlkreislaufes. Im Höhen- und Seitenleitwerk läuft die jeweils gekreuzte dicke Linie entlang der Anströmkante, im Seitenleitwerk wird diese oben und unten dadurch begrenzt. Die Maße sind hier beispielhaft als Anhalt für ein Passagierflugzeug kleinerer Bauart vorgesehen.

Neben der kontinuierlichen Erwärmung der Struktur entlag der dicken Linien über die in der Flügelwand verlegten Rohre der Kühlkreislaufeinrichtung wird hier eine zyklische Betriebsweise derart gewählt, dass die beiden Bereiche 1 mit ihren beidseitig zur Anströmkante liegenden Bereichen am Höhenleitwerk, d.h. die vier dazu zugeordneten Bereiche über Mikrowelle beispielsweise 30 sec beheizt werden, dann die Zyklusbereiche 2, 3 und schließlich der Zyklusbereich 4 am Seitenleitwerk, um

danach erneut mit dem folgenden Zyklus bei 1 wieder zu beginnen. Der Bereichszyklus ist also 1, 2, 3, 4. Werden die beiden Zyklusbereiche 1 erwärmt, werden hier die andern während dieser Zeit nicht erwärmt. Damit sind in dieser Teilzeit aus der Zykluszeit auch nur die beiden Mikrowellenquellen für die Oberflächensegmente 1 2 Wärmequellen, danach 2, 3 und letztlich 4. Danach beginnt der Zyklus wieder bei 1.

Ein Kühlmittelkreislauf, der mindestens eine Gruppe an Doppelleitungen und die zugehörigen Mikrowellenquellen, bzw. deren Wärmequellen enthält, zeigt Figur 4. Die Darstellung ist schematisch in die Ebene gelegt. Sie zeigt den durchgehenden Doppelleitungsbereich entlang der angeströmten Kante und die davon beidseitig senkrecht abgehenden Doppelleitungszweige. Die Doppelleitungszweige auf der einen Seite sind verlängert und haben am Ende die Mikrowellenquellen sitzen. Am einen Endbereich des durchgehenden Doppelleitungsbereichs ist beispielhaft und hier der Übersicht wegen die Kühlmittelpumpe in den Kreislauf eingebaut. Durch diese Anordnung und Anschlussweise sind die Mikrowellenquellen, wie gefordert strömungstechnisch hintereinander geschaltet und die Doppelleitungen haben eine Hin- und Rückströmung. Die Doppelleitungszweige, die jeweils zu einer Mikrowellenquelle weiterführen, tauchen dazu in die Hohlkörper-Struktur weg. Es gibt zwei Temperaturdifferenzen, die zum Antrieb des Kühlmittelkreislaufes beitragen, einmal  $\Delta T_{MQ}$  an der Kühlschlange der Mikrowellenquelle und zum andern  $\Delta T_{HW}$  auf dem Weg von der Hohlkörper-Wand zur Mikrowellenquelle.

### Zusammenfassung

Ein mikrowellentechnische Einrichtung zur Eisfreihaltung und Enteisung von Bereichen auf Hohlkörper-Strukturen hält atmosphärisch angeströmte Kanten und davon abgehende linienförmige Bereiche über einen Kühlmittelkreislauf eisfrei. Die Oberflächensegmente zwischen den linienförmigen Bereichen werden über Mikrowelleneinwirkung auf die Wand dieser Oberflächensegmente und der dadurch erfolgenden Erwärmung durch Ankopplung durch Tauen der Grenzschicht zwischen Eis und Oberfläche eisfrei gemacht. Hierzu befinden sich hinter der Wand des Anströmberreichs aneinander gereihte, mikrowellendichte Kammern, in die jeweils eine Mikrowellenquelle über eine darin eingebaute Auskoppelstruktur einspeist und hoch-/vielmodig darin erregt. Die Abwärme der Mikrowellenquellen wird über einen Kühlkreislauf aufgenommen und Doppelleitungen in der Kante und den davon abgehenden linienförmigen Bereichen zur Dauererwärmung und damit Eisfreihaltung transportiert. Die Mikrowellenquellen werden zyklisch betrieben.

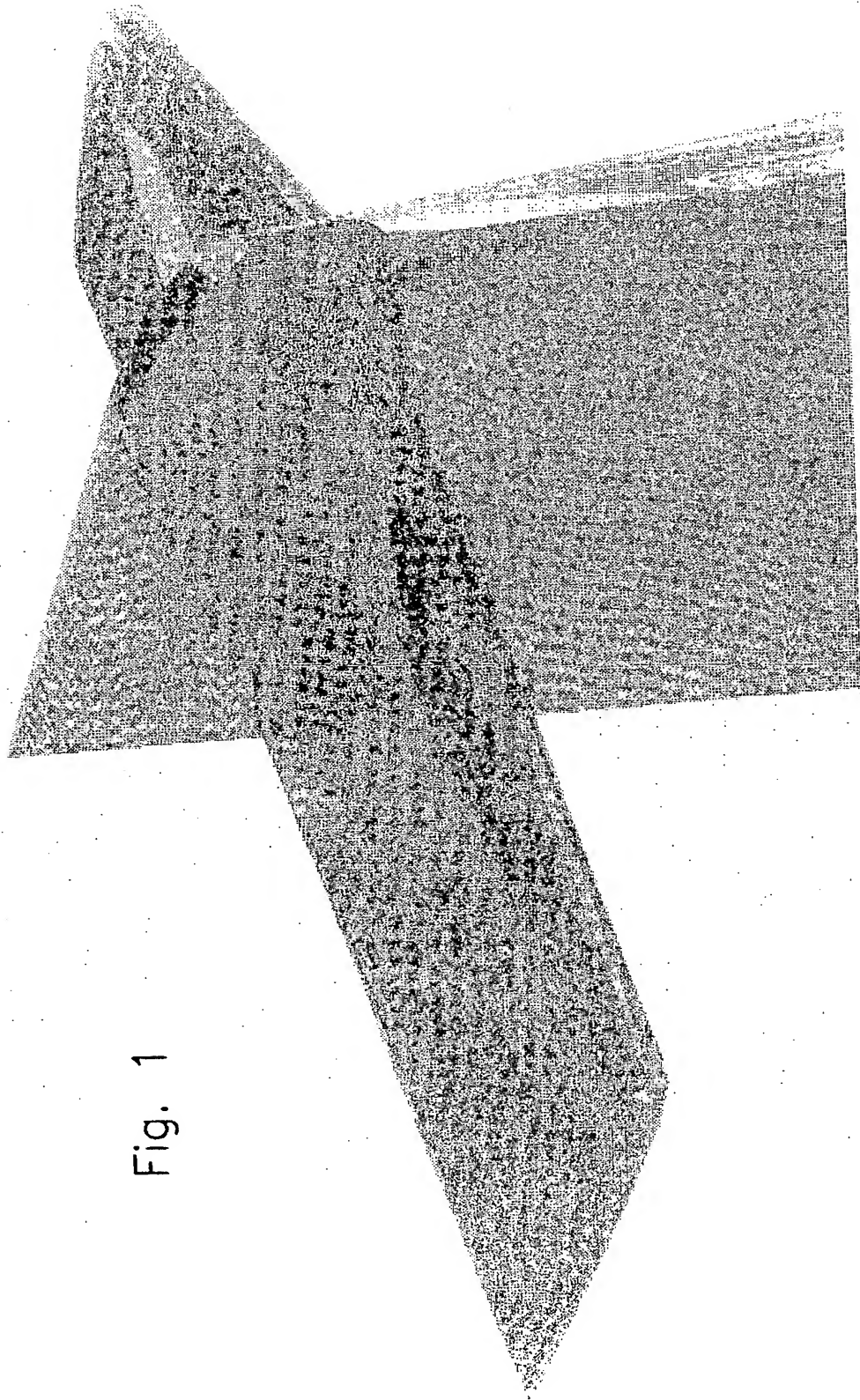


Fig. 1



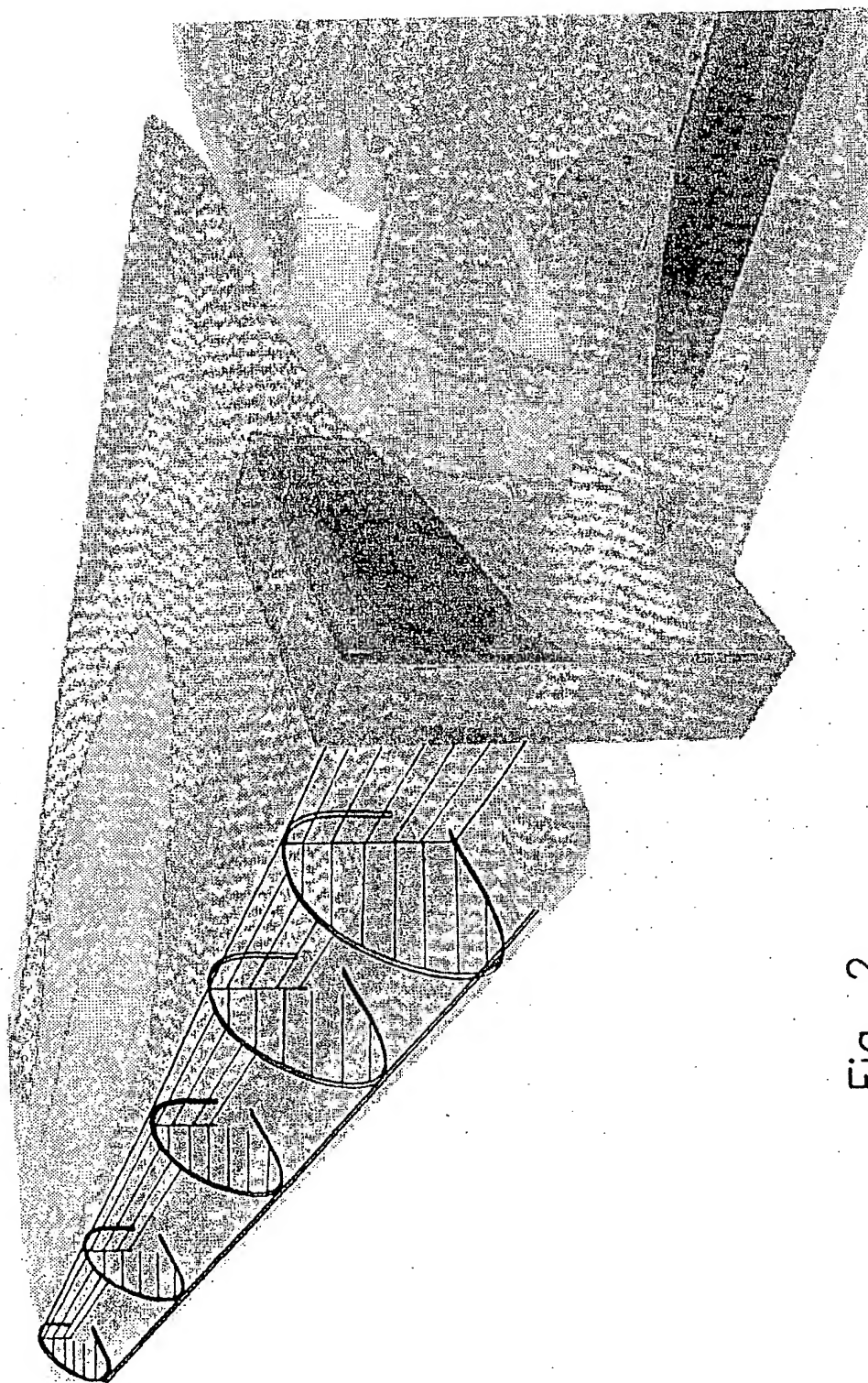
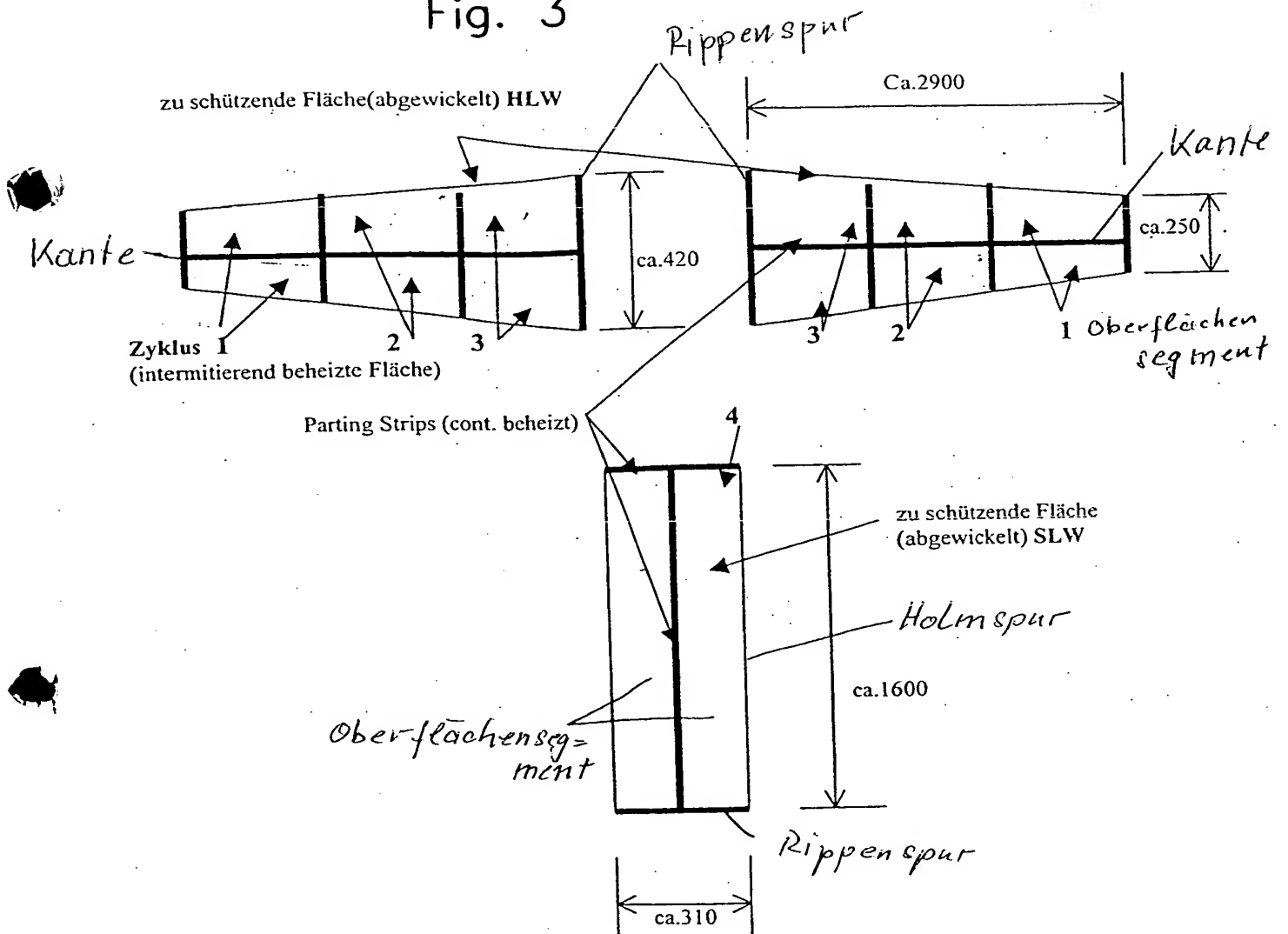


Fig. 2

Fig. 3



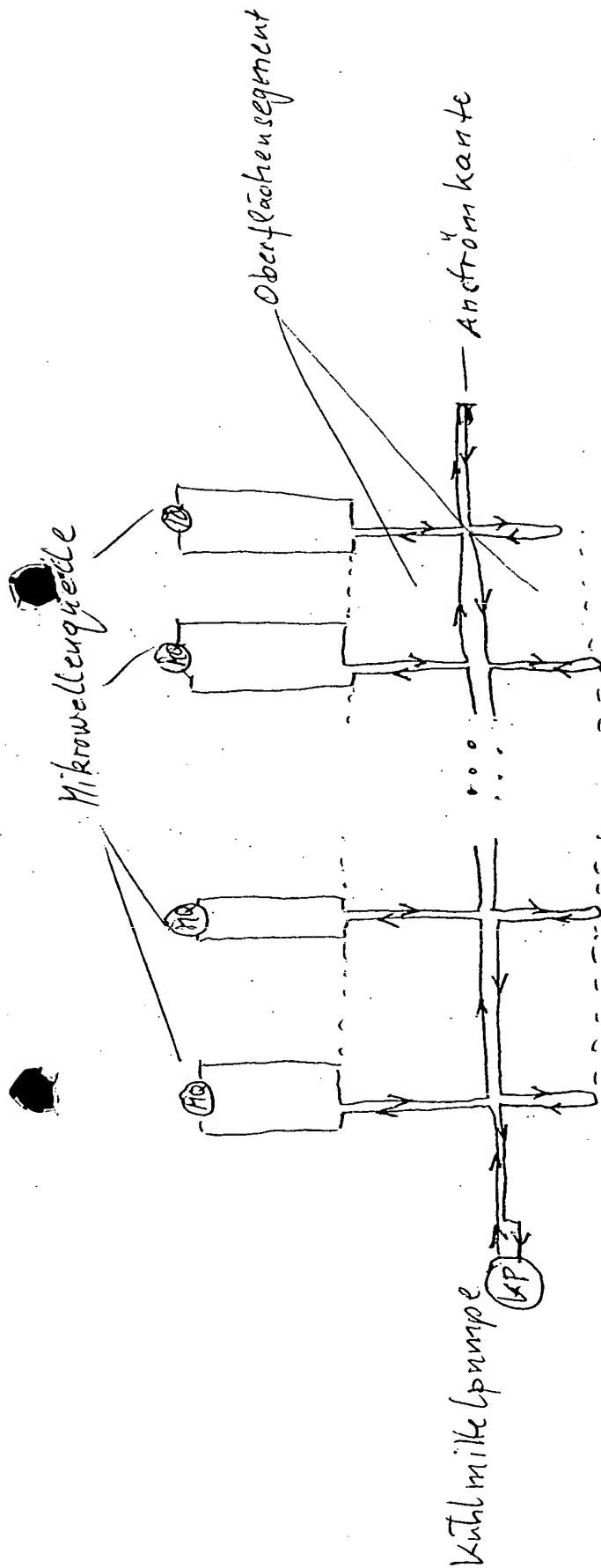


Fig 4 KÜHLMITTELKREISLAUF